

Рис. 2. График зависимости поверхностной температуры капли-брызги (диаметр 1,6 мм) на поверхности свариваемого изделия (на расстоянии 30 мм от оси шва) от времени нахождения (начальная температура изделия в момент касания капли 2730С, на 15 секунде  $T_{изд} = T_{капли}$  )

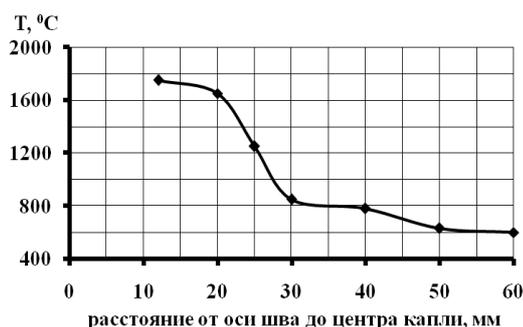


Рис. 3. График зависимости поверхностной температуры капли-брызги в момент соприкосновения с поверхностью свариваемого изделия на расстояния от оси шва (капли диаметром  $\geq 1,6$  мм)

Экспериментально определена поверхностная температура капли-брызги (капли диаметром  $\geq 1,6$  мм) в момент соприкосновения с твердой поверхностью свариваемой детали, которая лежит в пределах от 1750 °C до 500 °C на расстоянии от оси шва 10 – 60 мм соответственно, что вызывает не только сцепление брызг с поверхностью свариваемых изделий, но и способствует неблагоприятным изменениям структуро-фазового состава поверхностных слоев, под каплями, что необходимо избегать особенно при сварке сталей аустенитного класса.

Список используемых источников:

1. Fed'ko, V.T., Sapozhkov, S.B. (1999), Investigation of temperature fields in the contact zone of droplets (splashes) on molten metal with the surface of welded metal, *Welding Int.* 13(4): 310-313. doi: 10.1080/09507119909447386.
2. Il'yashchenko, D.P., Sapozhkov, S.B. Splashing in manual arc coated electrode welding and methods of reducing splashing (2008) *Welding International*, 22 (12), pp. 874-877.
3. Зернин Е.А., Томас К.И. Автоматизированный метод исследования процесса нанесения покрытий// *Инженерный вестник дона.* – 2015. - Т. 36. № 2-2. – С. 70.
4. Dmitry P. Ilyashchenko, Dmitry A. Chinakhov, Elena V. Verkhoturova, Elena V. Lavrova/ Stability of mma welding with protective coatings structural integrity and life// *Vol. 20, No 1 (2020)*, pp. 33–36.

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СВАРНОГО ШВА В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti-6Al-4V, ПОЛУЧЕННЫХ АДДИТИВНЫМИ МЕТОДАМИ

А. Яхин, аспирант,

Томский политехнический университет,  
634050, г. Томск пр. Ленина 30, тел. (3822)-12-34-56,  
E-mail: albertodebertto@mail.ru

**Аннотация:** В данной работе проводился сравнительный анализ микроструктуры и микротвердости сварных соединений, полученных методом электроннолучевой сварки (ЭЛС). В качестве образцов исследовались пластины, полученные прокаткой и аддитивным методом EBF<sup>3</sup> (electron-beam freeform fabrication – электронно-лучевое изготовление свободной формы). Выявлено аналогичное формирование трех сварочных зон после ЭЛС в 3D-напечатанных образцах. Показано влияние исходной структуры на процесс формирования сварного соединения. Из результатов дюрOMETРИЧЕСКОГО анализа следует, что зона плавления (FZ) характеризуется повышенной микротвердостью относительно основного материала. Однако в случае образцов, полученных методом EBF<sup>3</sup>, характер повышения отличается, что связано с особенностями формирования сварного шва.

**Abstract:** Comparing analysis of the microstructure and microhardness has been investigated in electron-beam welded Ti-6Al-4V alloy parts obtained by rolling and additive manufacturing. Electron-beam

welding produced three distinct zones (FZ – the fusion zone, HAZ – the heat affected zone, BM - the base metal) in the welded material. The influence of the BM on the structure of welded joint is shown. According to the results of microhardness testing, it follows that in the FZ the microhardness is higher than in the BM. However, for samples obtained by EBF<sup>3</sup>, the nature of the increase is different due to the features of the formed microstructure during welding.

**Ключевые слова:** Ti-6Al-4V, титановые сплавы, аддитивные технологии, проволока, EBF<sup>3</sup>, ЭЛС, сварка.

**Keyword:** Ti-6Al-4V, titanium alloys, additive manufacturing, wire, EBF<sup>3</sup>, EBW, welding.

Инновационные технологии способствуют развитию машиностроения. В последнее время активно исследуются аддитивные методы построения металлических изделий. Одним из важных направлений является 3D-печать титановыми сплавами [1,2]. Данный метод пока не позволяет создать целиком готовое крупногабаритное изделие. В связи с этим возникает вопрос соединения аддитивно полученных материалов и деталей. Одним из традиционных методов соединения металлов является сварка. Так как титановые сплавы в основном используются в авиа- и ракетостроении, то для соединения ответственных узлов используется электронно-лучевая сварка. Высокая концентрация тепла, точное позиционирование и отсутствие насыщения расплавленного металла атмосферными газами позволяют получать качественные сварные соединения. А регулируя фокусировку, мощность и ширину пучка, траекторию движения луча в зоне шва, можно менять характер плавления металла, тем самым добиваясь необходимых физико-механических свойств соединений в соответствии с условиями эксплуатации конструкций. Применение данного метода для сварки традиционно полученных материалов достаточно хорошо изучено [3-5], в отличие от сварки 3D-напечатанных изделий. Таким образом, целью данной работы является исследование особенностей формирования сварного соединения в изделиях из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных аддитивными методами.

Исследования проводили на образцах сплава Ti-6Al-4V, полученных прокаткой и EBF<sup>3</sup>. Прокатанные образцы были в состоянии поставки, ГОСТ 22178-76. Образцы EBF<sup>3</sup> были изготовлены на установке электронно-лучевой сварки ЭЛУ-9 с установленным аппаратным и программным комплексом 6Е400, в вакууме  $133 \times (10^{-4} - 10^{-5})$  Па [6]. В ходе процесса EBF<sup>3</sup> использовалась проволока диаметром 1,6 мм из сплава титана Ti-6Al-4V марки Grade 5, её плавление осуществлялось пушкой с плазменным катодом с ускоряющим напряжением – 30 кВ, током пучка - 20 мА и скоростью подачи проволоки 2 м/мин под углом 35° к поверхности подложки. Электронно-лучевая сварка проводилась на установке ЭЛУ-9. Параметры ЭЛС представлены в таблице 1. Перед сваркой поверхности сопряжения тщательно очищались. Образцы подвергались двухсторонней сварке без разделки кромок.

Таблица 1

Параметры электронно-лучевой сварки исходных образцов

Образцы	Толщина свариваемых пластин, мм	Ускоряющее напряжение, кВ	Ток пучка, мА	Скорость сварки, мм/мин
Прокат	2	30	25	900
EBF <sup>3</sup>	6	30	50	900

Для исследования макро- и микроструктуры изготавливались продольные полированные металлографические шлифы. Травление шлифов образцов сплава Ti-6Al-4V проводили в растворе Кролла. Микроструктуру изучали на оптическом микроскопе ZEISS AXIOVERT 40 MAT. Микротвердость по Виккерсу измерялась на боковой поверхности образцов сплава Ti-6Al-4V с использованием твердомера ПМТ-3 при нагрузке 100 г в течение 10 с.

По результатам микроструктурного анализа после ЭЛС у образца проката из титанового сплава Ti-6Al-4V отчетливо наблюдается три различные области: зона плавления (FZ), где осуществлялось плавление и повторное затвердевание металла, зона термического влияния (HAZ), которая подвергается тепловому циклу в твердом состоянии, и основной металл (BM), который в основном не зависит от процесса сварки (рис. 1а). Микроструктура проката BM (рис. 1б), представлена в основном равноосными зернами  $\alpha$ -Ti размером 3-10 мкм, по границам которых наблюдается  $\beta$ -фаза Ti. Частично встречается мелкодисперсная первичная  $\alpha$ -фаза, вытянутая в направлении BM (рис. 1б). FZ почти полностью состоит из игольчатой  $\alpha$ -фазы в предшествующих столбчатых  $\beta$ -зернах, что согласуется характеристикой бездиффузионного превращения  $\beta$ -фазы при быстром охлаждении. Данные зерна характеризуются вытянутой формой и размером от 50-150 мкм (рис. 4г). Происходит эпитаксиальный рост  $\beta$ -зерен в шве в направлении теплоотвода. HAZ можно описать как переходную область микроструктуры по отношению

к FZ с участками рекристаллизации, где микроструктура зависит от локальной температуры начала мартенситного превращения у основного материала ( $M_s$ ). На микрофотографии, представленной на рисунке 4г видно, что зона HAZ представлена укрупненной структурой основного металла и редкими игольчатыми  $\alpha'$  зернами, похожими на таковые в FZ, но с отличающейся морфологией.

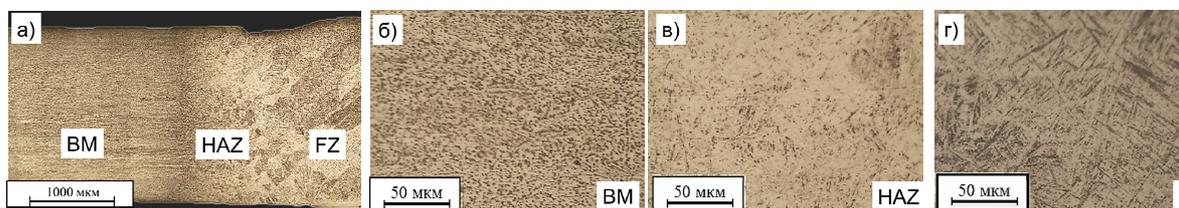


Рис. 1. Микроструктуры образца проката из титанового сплава Ti-6Al-4V. а) металлографическое изображение поперечного шлифа, б), в), г) микроизображения зон BM, HAZ, FZ

Похожим образом происходит формирование трех зон в образце EBF<sup>3</sup> (FZ, HAZ и BM), что наблюдается на рисунке 2а. Микроструктура основного материала BM представлена первичными столбчатыми зернами  $\beta$ -фазы, внутри которых наблюдается структура мартенсита (рис. 2б), образованная в результате аддитивного процесса EBF<sup>3</sup>. FZ сварного шва EBF<sup>3</sup> образцов наблюдается формирование столбчатых зерен  $\beta$ -фазы, состоящих из тонкой игольчатой  $\alpha'$ -фазы (рис. 2г). Однако размер столбчатых зерен больше (рис. 1а и 2а), чем в случае проката. В ходе плавления в образце EBF<sup>3</sup> происходит наследование поперечных размеров столбчатых  $\beta$ -зерен от основного материала к шву, что связано с зарождением  $\beta$ -зерен из расплава на  $\beta$ -зернах исходного сплава. HAZ представлена столбчатыми  $\beta$ -зернами основного материала, рис. 2а. Внутри данных зерен структура также состоит из игольчатой  $\alpha'$ -фазы, морфология (рис. 2в) которой зависит от локальной температуры и, следовательно, от расстояния до зоны FZ.

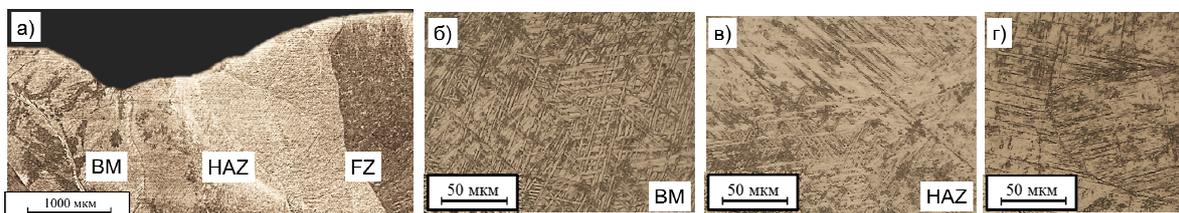


Рис. 2. Микроструктуры образца EBF<sup>3</sup> из титанового сплава Ti-6Al-4V. а) металлографическое изображение поперечного шлифа, б), в), г) микроизображения зон BM, HAZ, FZ

По результатам дюрOMETрического анализа (рис. 3) образцов видно, что в исходном прокате микротвердость составляет около 4,5 ГПа, а в сварном шве – около 5 ГПа в связи с образованием мартенситной структуры. В образцах EBF<sup>3</sup> твердость основного металла 4,1 ГПа, что объясняется грубой игольчатой структурой, т.е. поперечный размер ламелей больше, чем в сварном шве. Микротвердость в FZ составляет также 5 ГПа. Формирование тонкой структуры в зоне FZ связано с большей скоростью охлаждения, чем в HAZ. Значения твердостей в зоне термического влияния постепенно снижаются от значений в зоне плавления (FZ) к основному металлу (BM) для всех образцов.

В результате проведенных исследований сварных соединений, полученных ЭЛС, было выявлено образование трех сварных зон (FZ, HAZ, BM) в изделиях из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных как прокаткой, так и аддитивным методом EBF<sup>3</sup>. В зоне плавления (FZ) исследованных образцов образуются первичные  $\beta$ -зерна, внутри которых наблюдается тонкая мартенситная структура. Характер и размеры зерен, образующихся в зоне термического влияния образцов проката и EBF<sup>3</sup>, различаются в виду закономерностей наследования структуры основного материала. Показано повышение твердости в зоне плавления, что связано с образованием более тонкой мартенситной структуры. Происходит переходное снижение микротвердости в HAZ при удалении от зоны плавления.

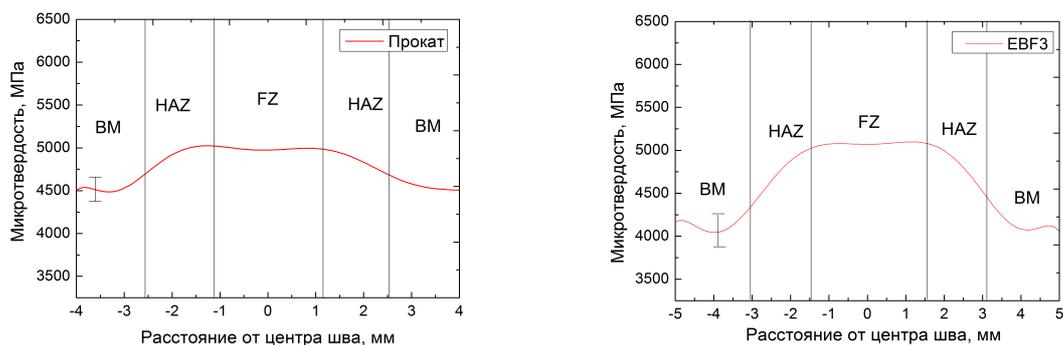


Рис. 3. Распределения микротвердости образцов проката и EBF<sup>3</sup> после ЭЛС

Список используемых источников:

5. Rafi H. K., Karthik N. V., Gong H., Starr T. L., Stucker B. E. Microstructures and Mechanical Properties of Ti6Al4V Parts Fabricated by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2013. – V. 22., № 12. – P. 3872–3883.
6. Hasan S.F., Casey R.S., Kazunori H. Metal Additive Manufacturing for Microelectromechanical Systems: Titanium Alloy (Ti-6Al-4V)-based Nanopositioning Flexure Fabricated by Electron Beam Melting // Sensors and Actuators, A: Physical. 2016. V. 249. P. 284-293.
7. Куликов В.П. Технология сварки плавлением и термической резки / Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2016. 463 с.
8. Башенко В.В. Электронно-лучевые установки / М.: Машиностроение, 1972. 168 с.
9. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
10. Panin A., Kazachenok M., Perevalova O., Martynov S., Panina A., Sklyarova E. Continuous Electron Beam Post-Treatment of EBF3-Fabricated Ti-6Al-4V Parts // Metals. – 2019. – V. 9., № 6. – P. 1-16.